

**Скороспешкин Максим Владимирович**, канд. техн. наук, доцент кафедры автоматики и компьютерных систем Института кибернетики ТПУ.

E-mail: [smax@aics.ru](mailto:smax@aics.ru)

Область научных интересов: адаптивные системы управления, корректирующие устройства систем автоматического управления.

**Скороспешкин Владимир Николаевич**, канд. техн. наук, доцент кафедры автоматики и компьютерных систем Института кибернетики ТПУ.

E-mail: [space@aics.ru](mailto:space@aics.ru)

Область научных интересов: адаптивные системы управления, цифровые регуляторы.

**Аврамчук Валерий Степанович**, 1978 г.р., канд. техн. наук, доцент кафедры автоматики и компьютерных систем Института кибернетики ТПУ.

E-mail: [avs@tpu.ru](mailto:avs@tpu.ru)

Область научных интересов: применение аппарата нечеткой логики в системах управления, спектральный анализ сигналов.

УДК 681.511.4

## ЦИФРОВОЙ АДАПТИВНЫЙ РЕГУЛЯТОР ДЛЯ ОБЪЕКТОВ УПРАВЛЕНИЯ ВТОРОГО ПОРЯДКА

М.В. Скороспешкин, В.Н. Скороспешкин,  
В.С. Аврамчук

Томский политехнический университет  
E-mail: [smax@tpu.ru](mailto:smax@tpu.ru)

Показана возможность создания цифрового адаптивного регулятора на базе цифрового оптимального регулятора и последовательного цифрового адаптивного корректора динамических характеристик систем автоматического регулирования с амплитудным ослаблением. Установлено, что применение такого регулятора позволяет существенно улучшить качество переходных процессов в системах автоматического регулирования нестационарными объектами. Сделан вывод о том, что подобные системы целесообразно применять как при регулировании технологических параметров нестационарных объектов, так и при регулировании технологических параметров стационарных объектов, на которые поступают возмущения, приводящие к возникновению колебаний регулируемой величины с амплитудой, превышающей допустимую.

### Ключевые слова:

Цифровой регулятор, корректор динамических характеристик, система автоматического регулирования с амплитудным ослаблением, качество регулирования, нестационарный объект регулирования.

### Key words:

Digital regulator, corrector of dynamic characteristics, systems of automatic control with amplitude attenuation, quality of control, non-stationary object of control.

В настоящее время реализация систем автоматического регулирования (САР) в большинстве случаев производится на базе промышленных микропроцессорных контроллеров, что позволяет осуществлять адаптивное регулирование.

Центральным вопросом, решаемым при разработке адаптивных систем управления, является выбор принципа адаптации и структуры системы. Используемый достаточно часто в составе адаптивной системы ПИД-регулятор не обеспечивает оптимального управления по критерию максимального быстродействия, и в этой связи актуальным является разработка цифровых адаптивных оптимальных регуляторов.

В настоящей работе предлагается реализация цифрового адаптивного регулятора на базе цифрового оптимального регулятора [1], дополненного последовательным цифровым адаптивным корректором динамических характеристик с амплитудным ослаблением. Используемый корректор представляет собой псевдолинейное корректирующее устройство, осуществляющее изменение коэффициента передачи канала формирования управляющего воздействия при возникновении колебаний.

Структура системы с цифровым адаптивным регулятором представлена на рис. 1. Используются следующие обозначения: АК – цифровой адаптивный корректор; ОР – оптимальный регулятор; ОУ – объект управления;  $G$  – задающее воздействие;  $E$  – ошибка регулирования;  $E2$  – выходной сигнал цифрового адаптивного корректора;  $U$  – управляющее воздействие;  $Y$  – выходная величина объекта управления.

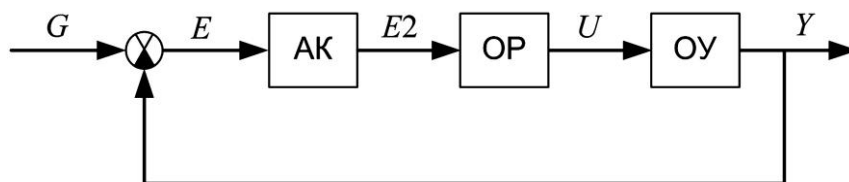


Рис. 1. Структура САР с цифровым адаптивным регулятором

Как показано в [1] для объекта управления с передаточной функцией вида:

$$W(p) = \frac{a}{p(p+b)},$$

где  $a$  и  $b$  – коэффициенты передаточной функции, определяющие статические и динамические свойства; оптимальный регулятор, обеспечивающий максимальное быстродействие и монотонный переходный процесс, имеет дискретную передаточную функцию:

$$W(z) = K_0 \frac{1+b_1 z^{-1}}{1+a_1 z^{-1}},$$

где  $K_0 = \frac{b}{ah(1-B)}$ ;  $b_1 = -B$ ;  $a_1 = \frac{1-B(1+bh)}{bh(1-B)}$ ;  $B = e^{-bh}$ ;  $h$  – такт управления.

Проведенные в среде MatLab 6.5 исследования САР с данным регулятором показали его хорошую работоспособность лишь в небольшом диапазоне изменения параметров объекта управления. Для обеспечения работоспособности САР объектом с переменными параметрами линейный оптимальный регулятор дополнен псевдолинейным адаптивным корректором, совместно с которым реализуется нелинейный закон регулирования.

На рис. 2 представлена структурная схема адаптивного корректора. Используются следующие обозначения: Sign – блок определения знака;  $W(z)$  – дискретная передаточная функция динамического звена; МОД – блок выделения модуля; БУ – блок умножения; БАА – блок анализа амплитуды ошибки САР; БКК – блок коррекции коэффициента;  $E1$  – выходной сигнал блока выделения модуля.

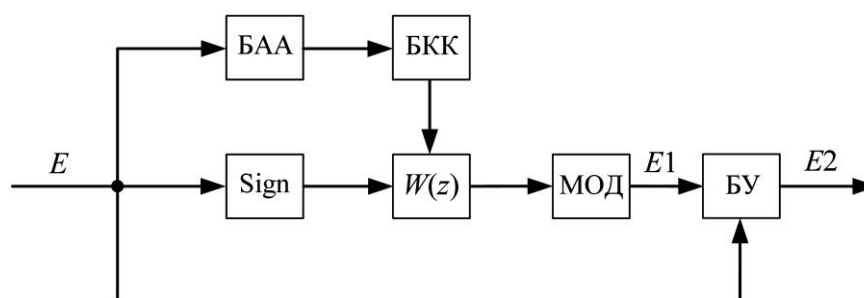


Рис. 2. Структурная схема адаптивного корректора

Адаптивный корректор выполнен на базе фильтра, описанного в [2], однако этому фильтру кроме амплитудного ослабления (частотной адаптации, состоящей в подавлении высоких частот), придано дополнительно свойство параметрической адаптации. Параметрическая адаптация осуществляется путем изменения статического коэффициента передачи линейного динамического звена с дискретной передаточной функцией:

$$W(z) = \frac{K\gamma}{1 - (1-\gamma)z^{-1}} = \frac{Y(z)}{X(z)},$$

где  $K$  – коэффициент передачи,  $K < 1$ ;  $\gamma$  – коэффициент, определяемый тактом управления и постоянной времени динамического звена;  $X$  – входная величина;  $Y$  – выходная величина.

Данное динамическое звено соответствует в непрерывном варианте фильтру низких частот, реализованному на базе апериодического звена первого порядка с передаточной функцией:

$$W(p) = \frac{K}{Tp + 1}.$$

Параметр  $\gamma$  определяется по формуле:

$$\gamma = \frac{T_0}{T + T_0},$$

где  $T_0$  – период дискретизации;  $T$  – постоянная времени фильтра.

Данный корректор обеспечивает ослабление амплитуды с ростом частоты без изменения фазы. Как показано на рис. 2, входной сигнал проходит по трем каналам. По нижнему каналу сигнал проходит без изменения, средний канал состоит из блока определения знака (блока сигнатуры), фильтра низких частот и блока выделения модуля. Верхний канал обеспечивает подстройку статического коэффициента передачи фильтра низких частот. Сигнал на выходе корректора равен произведению выходных сигналов нижнего и среднего каналов

$$E2 = E \cdot E1.$$

При возникновении в САР колебаний регулируемой величины в корректоре автоматически происходит уменьшение коэффициента передачи гармонического сигнала или амплитудное ослабление. Другими словами происходит подавление колебаний регулируемой величины.

Ниже приведены результаты исследования САР с объектом управления, имеющим передаточную функцию

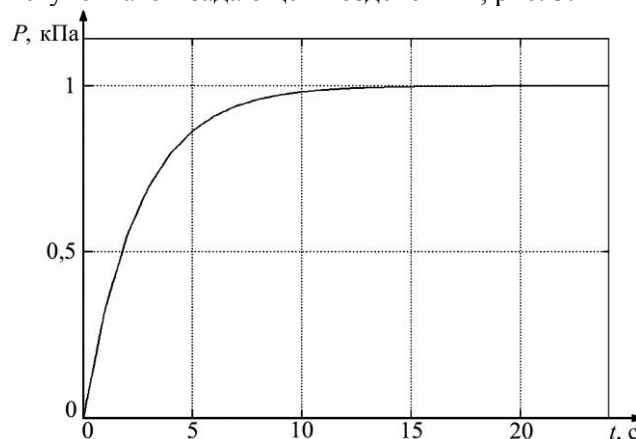
$$W(p) = \frac{1}{p(p+1)}.$$

Такт управления  $h=0,05$  с.

В соответствии с [1], дискретной передаточной функцией оптимального регулятора для данного объекта управления является

$$W(z) = \frac{1 - 0,951z^{-1}}{1 + 0,496z^{-1}}.$$

Оптимальный регулятор обеспечивает минимальное время переходного процесса без перерегулирования при ступенчатом задающем воздействии, рис. 3.



**Рис. 3.** Реакция САР на ступенчатое задающее воздействие

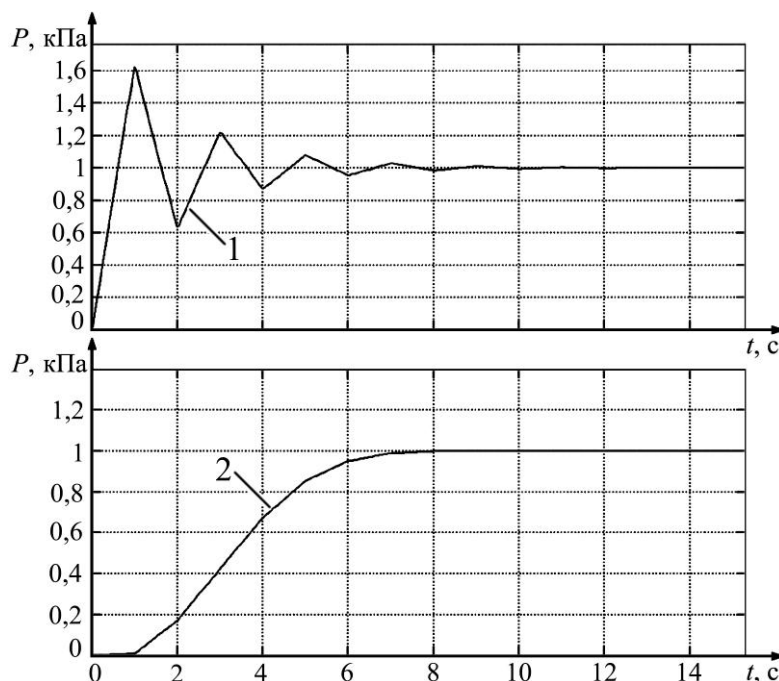
При изменении характеристик объекта управления данный регулятор уже не обеспечивает монотонного переходного процесса.

Для улучшения качества переходного процесса в САР вводится последовательный цифровой адаптивный корректор, осуществляющий изменение коэффициента передачи канала формирования управляющего воздействия при возникновении колебаний.

На рис. 4 представлены кривые, характеризующие реакцию на единичное ступенчатое воздействие САР объектом второго порядка с изменившимся статическим коэффициентом передачи, что характеризует изменение его свойств, как нестационарного объекта. Передаточная функция данного объекта управления имеет вид

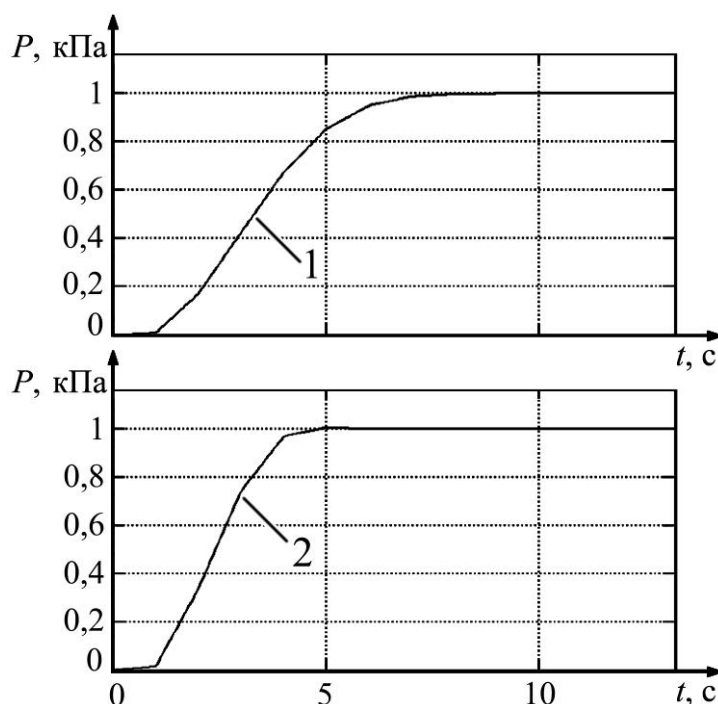
$$W(p) = \frac{5}{p(p+1)}.$$

Кривая 1 соответствует САР с оптимальным регулятором, а кривая 2 – САР с оптимальным регулятором и описанным выше корректором.

**Рис. 4.** Реакция САР на ступенчатое задающее воздействие

Результаты исследования САР с корректором с амплитудным ослаблением, проведенные в среде Matlab 6.5, показали, что существенное улучшение качества переходных процессов в САР нестационарными объектами возможно путем изменения статического коэффициента передачи фильтра в зависимости от амплитуды колебаний ошибки. Для этих целей используется верхний канал. В блоке БАА происходит определение амплитуды колебаний ошибки. Если амплитуда превышает установленный порог, происходит уменьшение статического коэффициента передачи фильтра до тех пор, пока амплитуда не станет меньше порогового значения. Уменьшение статического коэффициента передачи фильтра осуществляется блоком БКК. Данный блок реализован на динамическом звене первого порядка и нелинейном звене типа «насыщение».

На рис. 5 представлены кривые, характеризующие реакцию САР объектом второго порядка на ступенчатое задающее воздействие.



**Рис. 5.** Реакция на ступенчатое задающее воздействие САР с оптимальным регулятором и корректором без подстройки статического коэффициента передачи фильтра (1) и с подстройкой (2)

Исследования САР объектами управления с передаточными функциями:

$$W(p) = \frac{\alpha}{(p+a)(p+b)} \text{ и } W(p) = \frac{\alpha}{(p+a)^2}$$

также показали эффективность предлагаемого цифрового адаптивного регулятора.

Результаты исследования САР с корректором, в котором происходит подстройка как по амплитуде колебаний, так и по частоте, показали, что такие системы целесообразно применять как при регулировании параметров нестационарных объектов, так и при регулировании параметров объектов, на которые поступают возмущения, приводящие к возникновению в САР колебаний регулируемой величины с амплитудой, превышающей допустимую.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гостев В.И. Системы управления с цифровыми регуляторами. Справочник. – Киев: Техника, 1990. – 280 с.
2. Скороспешкин М.В. Цифровой адаптивный регулятор. Сборник научных трудов Сургут. гос. ун-та. Вып. 19. Физико-математические и технические науки. – Сургут: Изд-во СурГУ, 2004. – 150 с.

Поступила 12.10.2011 г.